



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA



Efecto del ozono troposférico en los materiales de construcción

Stephany Rodríguez Rengifo

**Pontificia Universidad Javeriana
Cali, Colombia**

Resumen

Desde mediados del siglo pasado el aumento de los eventos climáticos ha conducido a cambios globales de temperatura, precipitaciones, afectaciones de las condiciones del suelo y presencia de eventos climáticos extremos. En razón a lo anterior, es pertinente considerar la afectación de estos cambios en la patología de los materiales de construcción y edificaciones ya que suelen generarse subproductos de compuestos químicos y material particulado sobre la superficie de los bienes muebles, visibles a través de su deterioro y pérdida de las propiedades características de su color.

Por lo general, el efecto del ozono troposférico, uno de los contaminantes presentes en el ambiente, es categorizado como crónico, ya que ejerce afectaciones irreversibles de forma paulatina a través del tiempo. Justamente, la globalización acompañada de la masificación de vivienda y el aumento de sectores productivos, han traído un crecimiento acelerado de la industria y la urbanización con las consecuentes alteraciones en el deterioro y envejecimiento estructural de los materiales utilizados en construcción. En esta estrecha relación de contaminación y autodaño se encuentra el sector del desarrollo de la infraestructura de la obra civil, pues en la actualidad este se ve afectado por una cantidad considerable de factores ambientales causantes del incremento de la corrosión metálica ante la exposición a ambientes agresivos y del deterioro de los materiales por el contacto con partículas suspendidas en la tropósfera.

En este estudio se analiza el efecto del ozono troposférico y el impacto que tiene en las obras civiles. Para realizar este trabajo, se realizó una revisión bibliográfica en fuentes especializadas con la cual se identificaron estrategias de mitigación ante los efectos adversos de este contaminante.

Los resultados del estudio muestran como alternativa preventiva ante esta problemática, además de la implementación de la construcción sostenible y conciencia medioambiental, se deben identificar los niveles de concentración de los contaminantes presentes en la tropósfera que tienen un contacto directo con las infraestructuras, analizando su mecanismo de transporte y su medio de contacto para un eficiente manejo del sector ambiental salvaguardando así la vida útil de los materiales de las obras civiles. Además, como estrategia de solución se pueden realizar intervenciones sobre las lesiones presentadas que permitan el estudio y evaluación de la rehabilitación de las edificaciones como objetos físicos a través de la recuperación de las principales características que habían perdido su función constructiva. En estudios posteriores se plantea el diseño experimental en donde se verifique la eficiencia en los tratamientos preventivos que se realicen a las áreas de deterioro por ozono troposférico.

Palabras clave: vulnerabilidad de los materiales de construcción; efecto del ozono troposférico, factores medioambientales

Abstract

Since the middle of the last century, the increase in climatic events has led to global changes in temperature, precipitation, soil conditions and the presence of extreme weather events. In view of the above, it is pertinent to consider the effect of these changes on the pathology of construction materials and buildings, since by-products of chemical compounds and particulate matter are usually generated on the surface of movable goods, visible through their deterioration and loss of the characteristic properties of their color.

In general, the effect of tropospheric ozone, one of the pollutants present in the environment, is categorized as chronic, since it has irreversible effects that are gradually affected over time. Globalization accompanied by the massification of housing and the increase of productive sectors have brought about an accelerated growth of industry and urbanization with the consequent alterations in the deterioration and structural aging of the materials used in construction. In this close relationship of contamination and self-harm is the sector of civil works infrastructure development, since it is currently affected by a considerable number of environmental factors that cause an increase in metallic corrosion due to exposure to aggressive environments and deterioration of materials due to contact with particles suspended in the troposphere.

This study analyzes the effect of tropospheric ozone and its impact on civil works. In order to carry out this work, a bibliographic review was made in specialized sources with which mitigation strategies for the adverse effects of this pollutant were identified.

The results of the study show that as a preventive alternative to this problem, in addition to the implementation of sustainable construction and environmental awareness, the concentration levels of pollutants present in the troposphere that have a direct contact with the infrastructure should be identified, analyzing their transport mechanism and their means of contact for an efficient management of the environmental sector, thus safeguarding the useful life of the materials of the civil works. In addition, as a solution strategy, interventions can be carried out on the lesions presented that



allow the study and evaluation of the rehabilitation of buildings as physical objects through the recovery of the main characteristics that had lost their constructive function. In subsequent studies, an experimental design is proposed to verify the efficiency of preventive treatments carried out in the areas of deterioration caused by tropospheric ozone.

Keywords: *vulnerability of building materials; tropospheric ozone effect; environmental factors*

1. Introducción

El efecto del ozono troposférico es categorizado como crónico, ya que ejerce afectaciones irreversibles de forma paulatina a través del tiempo. Se han presenciado en el aire diferentes contaminantes atmosféricos, los cuales influyen notoriamente en el deterioro de los materiales de construcción de las edificaciones, dentro de los más representativos están el ozono troposférico (O_3), el dióxido de carbono (CO_2), los compuestos de azufre (SO_x), los compuestos nitrogenados (NO_x), los iones cloruros (Cl^-) y el material particulado o PM. En este sentido, el impacto negativo de estos contaminantes puede variar desde un entorno local a uno global. (Kumas P, 2013).

Cabe resaltar, que la globalización ha traído consigo un crecimiento acelerado de la industria y la urbe, siendo estas fichas claves en el mal estado actual de la calidad del aire, trayendo consigo alteraciones en el deterioro y envejecimiento estructural de los materiales utilizados en construcción. En esta estrecha relación se encuentra el sector del desarrollo civil, pues este proporciona una cantidad considerable de afectaciones ambientales las cuales hacen parte de las causantes del incremento de la corrosión metálica ante la exposición a medio ambientes agresivos y, el deterioro de los materiales por el contacto con partículas suspendidas en la troposfera.

Como alternativa preventiva ante esta problemática, obviando la importancia de implementar la construcción sostenible y conciencia medioambiental, se debe identificar los niveles de concentración de los contaminantes presentes en la tropósfera que tienen un contacto directo con las infraestructuras, analizando su mecanismo de transporte y su medio de contacto para un eficiente manejo del sector ambiental salvaguardando la vida útil de los materiales de las obras civiles.

2. Objetivos

General: Señalar el efecto del ozono troposférico en la vida útil de los materiales utilizados en obras civiles según información de estudios previos.

Específico:

- Presentar los contaminantes troposféricos que ocasionan daños en las edificaciones y su medio de acción.
- Conocer los métodos para la evaluación de las lesiones en obras civiles.



3. Desarrollo

La urbe y el desarrollo civil son barreras contra las corrientes de aire, por esta razón son de forma directa elementos que permiten la acumulación de contaminantes troposféricos, facilitando la formación de costras negras a partir de la acumulación de cristales de sulfatos de calcio y de varios compuestos químicos, donde algunos precursores de esta eventualidad son los aerosoles, esporas y los PM (Materiales particulados), los cuales quedan atrapados. Sobre estos elementos expuestos a las fuentes de emisiones y el ozono troposférico actúan los mecanismos de deposición húmeda y seca (Ozga, 2016). En este sentido, los elementos que poseen mayor capacidad de retención resaltan por ser más agresivos al momento de hacer daño, ya que no están expuestos al impacto directo de condiciones externas como el aire, el sol y la lluvia.

Las manifestaciones de las lesiones medio ambientales en el sector constructivo son patologías como signos de deterioro, ennegrecimiento, amarilleamiento, corrosión y grietas en las fachadas. Es común, encontrar un patrón de color en las edificaciones, donde es más oscuro en los niveles iniciales y gradualmente disminuyen a medida que incrementa la altura. En muchas ocasiones las fuentes de contaminación troposférica en las zonas urbanas vienen de la industria y de factores antropogénicos.

Medir la calidad del aire es indispensable para monitorear las emisiones de gases de tipo invernadero, especialmente compuestos como el SO_2 , NO_x y el PM_{10} . Dado que estos compuestos frecuentan en la actualidad, se han desarrollado estudios para promover políticas y programas a favor del cuidado ambiental y la regulación de estos en el ozono troposférico enfocados en sectores multidisciplinarios como el de la salud, biodiversidad, vegetación y ahora en el sector constructivo. Ahora bien, la posibilidad de implementar alternativas puntuales de prevención ante las afectaciones en los materiales de construcción es limitada, pues aún no existe un mecanismo eficiente que estime la pérdida directa e indirecta de las edificaciones en razón a la corrosión y el deterioro, es decir, no se encuentra vigente un gran número de estrategias preventivas para ejecutar que promuevan el alargamiento de la vida útil de las estructuras y así mitigar significativamente sus patologías.

Métodos para evaluar las lesiones en obras civiles:

- a. Recopilación de información – Inicialmente es importante realizar una recopilación de datos sobre las edificaciones afectadas por lesiones físicas como la suciedad, humedad y erosión, lesiones mecánicas como deformaciones, grietas y desprendimientos y, lesiones químicas como las eflorescencias, oxidaciones y corrosiones provocados por la contaminación.
- b. Identificación del tipo de medio ambiental – Al realizar una correlación entre los contaminantes troposféricos registrados mediante el estudio de calidad del aire y sus niveles de concentración durante la última década se puede categorizar el tipo de medio ambiental en tres sectores: urbano, urbano/Industrial y normal. Teniendo los resultados, se debe establecer la clasificación atmosférica y el TDH (Tiempo de humectación) con base a la temperatura (T), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (V) in situ de la obra civil a evaluar.

c.



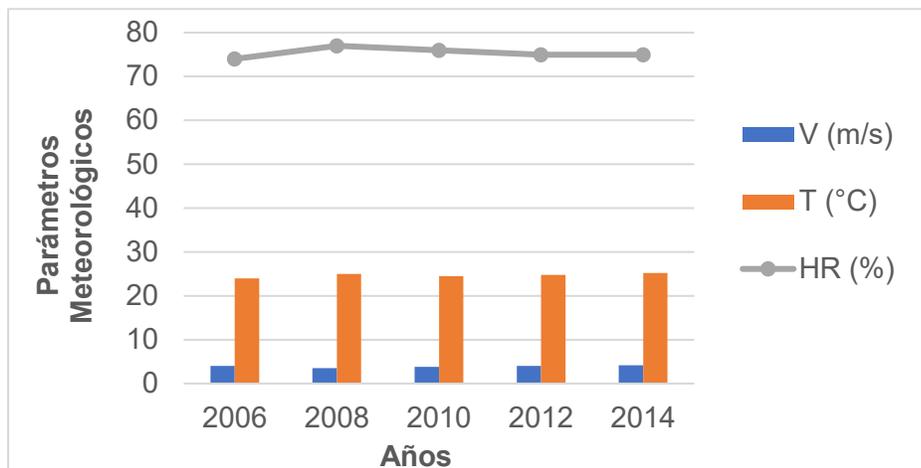


Figura 1. Datos climáticos registrados por el Instituto de Meteorología INSMET entre los años 1990 y 2014.
Fuente tomada y adaptada de Hernández A (2018).

- d. Cálculo de la corrosión en los metales – La corrosión generada por la pérdida paulatina de partículas de la superficie del metal evaluado se estima a través de la disminución de masa en metales como el acero, cobre, cinc o aluminio durante el tiempo de exposición, de acuerdo con la norma ISO 9223:2012. Se deben contemplar datos como la velocidad de deposición de contaminantes identificados, un ejemplo puede ser la velocidad de deposición del cloruro (Cl^-) y sulfuro (SO_2) (S_d y P_d respectivamente) y TDH, derivados para una distancia comprendida desde un lugar de referencia. [3] Para los cálculos matemáticos, se puede emplear diferentes softwares computacionales tales como Wolfram Mathematica versión 9.0 y para gráficos Origin Pro versión 8.0.

Variables	Valor
TDH (horas/año)	4966 – 3782
D_{Cl} (mg/md)	719.5 – 2.7
$[SO_2]$ (ug/m)	32.7

Tabla 1. Ejemplo de variables medidas en La Habana.
Fuente tomada y adaptada de Hernández A (2018).

Las ecuaciones propiciadas por la normativa ISO 9223:2012 para estimar la corrosión por parámetros medio ambientales, teniendo como referencia 1 año de exposición son las siguientes:



Figura 2. Estimación de la velocidad de corrosión para 1 año de exposición atmosférica.
Fuente tomada y adaptada de la normativa ISO 9223:2012.

Donde:

- r_{corr} : Velocidad de corrosión para n=1 años de exposición atmosférica, um/año.
- T: Temperatura del aire, °C.
- HR: Humedad relativa, %.
- P: Tasa de depósito de SO₂, mg/m² día.
- S: Tasa de depósito de Cl⁻, mg/m² día. (ISO 9223, 2012)

- e. Análisis para un escenario futuro de cambio climático – De acuerdo con Klimesmith (2007) las estimaciones de la pérdida de masa de los materiales para las proyecciones futuras modelan climático experimentado. En razón al incremento de la temperatura en °C a través de los años se espera un aumento considerable. Para este escenario futuro, se ejecuta el modelo de la curva dosis-respuesta para los siguientes metales:

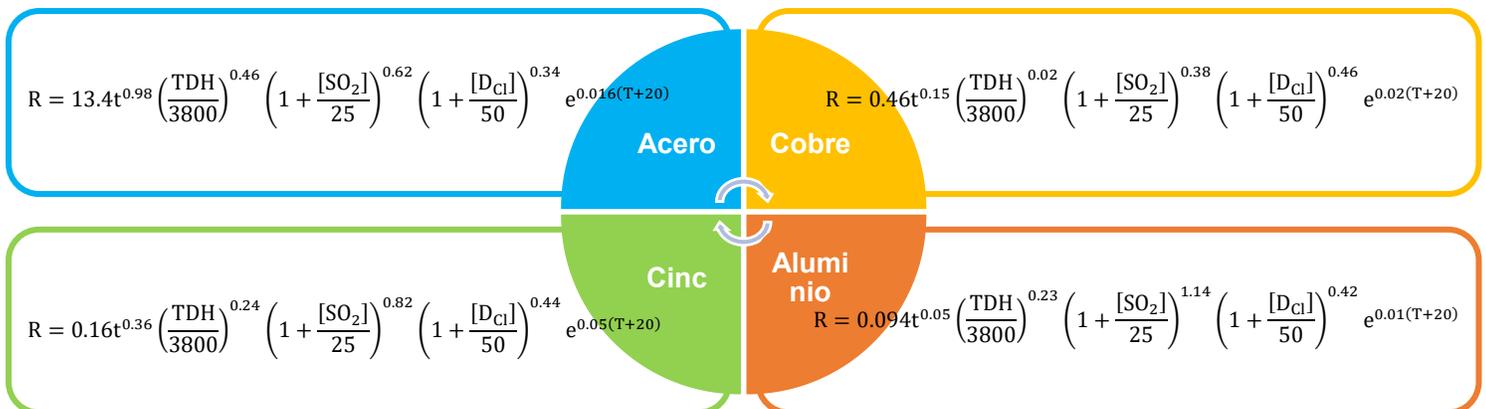


Figura 3. Estimación pérdida de masa por ataque corrosivo.
Fuente tomada y adaptada de la normativa ISO 9223:2012.

Donde:

- R: Pérdida de masa por ataque corrosivo, um/año.
- [SO₂]: Media anual de concentraciones gaseosas, ug/m³.



[D_{Cl}]: Deposición de cloruros, mg/m²d.
 TDH: Tiempo de humectación, horas/año.
 T: Temperatura media anual, °C.
 t: Tiempo de exposición, años. (ISO 9223, 2012)

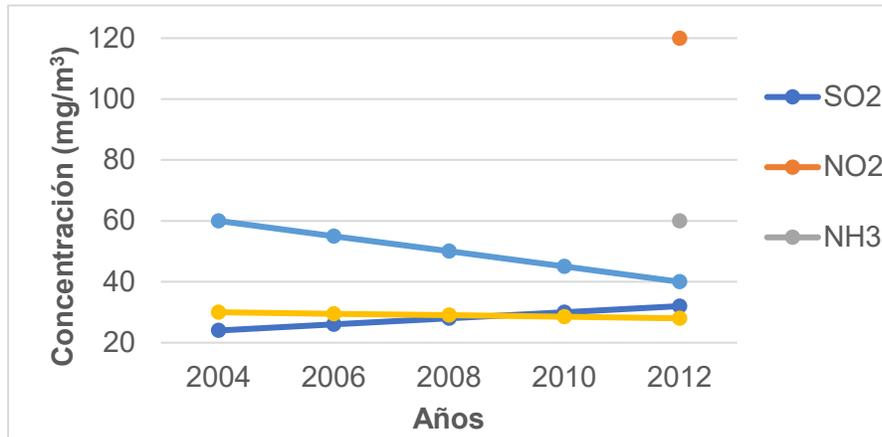


Figura 4. Ejemplo gráfico con la progresión de los niveles de contaminación del aire.
 Fuente tomada y adaptada de Hernández A (2018).





4. Resultados

De acuerdo con el desarrollo de los métodos para evaluar las lesiones en obras civiles se puede decir que, como resultado del aumento en las concentraciones de los contaminantes troposféricos, los materiales de construcción para las edificaciones muestran daños comunes como signos de ennegrecimiento, amarilleamiento, acidificación, pérdida de material, presencia de plantas superiores y crecimiento de microorganismos.

Los niveles de humedad relativa (HR) promedio anual y la frecuencia de precipitaciones propician la deposición húmeda de los contaminantes troposféricos sobre la superficie de las obras civiles. La velocidad del viento permite el transporte de partículas contaminantes varios kilómetros, extendiendo el daño troposférico hacia lugares con niveles de menor emisión. La humectación de los materiales cálcicos con una HR superior al 65% permite la activación de los mecanismos de transporte de los contaminantes como el dióxido de carbono (CO_2) y compuestos sulfurosos, incrementando la porosidad y acidificando el sustrato base. (Castañeda A, 2013) y (Howland J, 2012).

En base a diferentes estudios sobre la calidad del aire in situ se puede identificar que las edificaciones próximas a las avenidas con elevado tráfico de transporte vehicular son las de más afectación por la formación de costras negras y la acumulación de polvo. El impacto de los compuestos troposféricos sobre obras civiles con materiales como el hormigón armado produce disminución de alcalinidad en la pasta de cemento, lo que implica la pérdida pasiva del refuerzo de acero, iniciando así el fenómeno de la corrosión.

Los tipos de lesiones discutidos con anterioridad son ampliamente visibles en casi todas las edificaciones existentes, donde los mayores daños estéticos y estructurales se concentran en zonas densamente pobladas que se encuentran regularmente en avenidas con alto flujo de vehículos, evidenciando así que la durabilidad de los materiales es extremadamente baja lo cual provoca el deterioro a una tasa elevada.

5. Situación problema

Según estudio adelantado por Hernández A (2018), se encontraron los posibles efectos del acero de carbón para un escenario de cambio climático. En razón a lo anterior, en los últimos 100 años, las emisiones de contaminantes troposféricos han aumentado de forma gradual, teniendo un impacto negativo sobre las obras civiles, las cuales requieren la implementación de acciones, métodos y estrategias de mitigación basadas en la durabilidad de estas. Se hace relevante mencionar que

los eventos climáticos extremos y el efecto que producen en la ciudad es cada año más devastador, acelerando la velocidad de deterioro de las edificaciones en general.

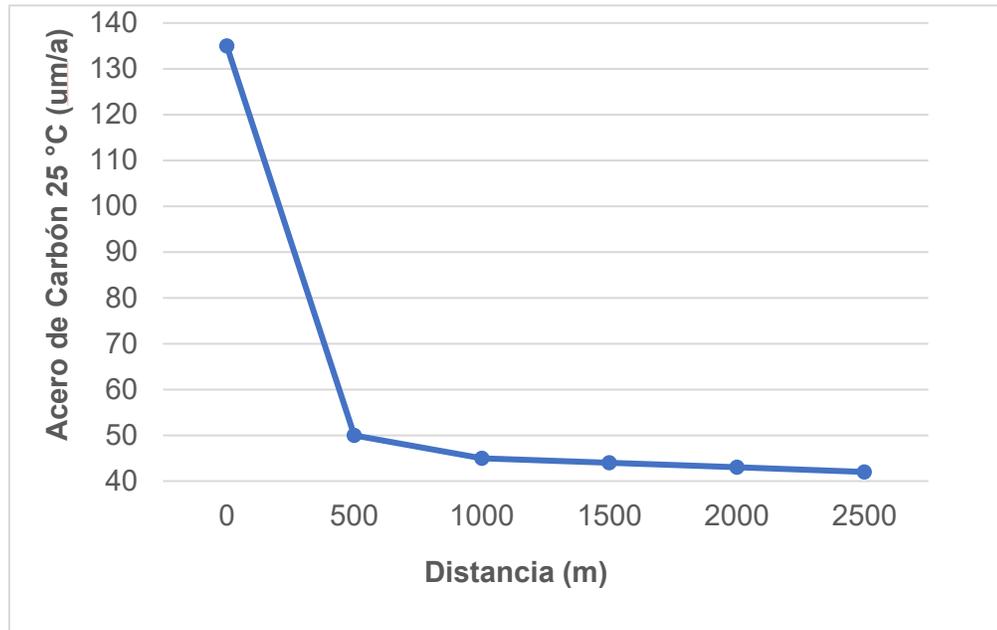


Figura 5. Efectos del acero de carbón a 25 °C para un escenario de cambio climático por distancias.
Fuente tomada y adaptada de Hernández A (2018).

Con base a los estudios realizados por Jacod y Winner (2009) los modelos climáticos para el siglo XXI muestran variaciones en el clima a nivel global, simulando un aumento en la temperatura de 1 a 2°C y como consecuencia una disminución de las precipitaciones en un 10%. De acuerdo a esta predicción, el clima en la región de Centro América será más cálido y seco, donde el aumento de la temperatura regional provocará el calentamiento del océano y del aire, lo que permite la posible formación de fenómenos naturales como huracanes. En este sentido, si se conserva el nivel de emisiones combinado con el escenario predictivo, los cambios medio ambientales aumentarán el secado de la vegetación urbana, el contenido de polvo suspendido en el aire, el contenido de partículas carbónicas y la velocidad de degradación de los materiales perdiendo así paulatinamente su utilidad constructiva.

De acuerdo con Grossi C (2007), la radiación solar puede acelerar el deterioro de los materiales orgánicos, tales como los tratamientos de conservación de la piedra o los recubrimientos de pintura. Es indispensable hacer hincapié en que los cambios en la temperatura afectan los ciclos de humectación y secado y, por lo tanto, la deposición de los contaminantes troposféricos en los materiales de construcción de las edificaciones como los metales como el acero al carbono, cobre y cinc, los cuales bajo estas condiciones serían los más afectados. En consecuencia, la velocidad de disolución de las estructuras compuestas principalmente por carbonato de calcio, aumentará. Finalmente, en la medida que la frecuencia de precipitaciones decline, las deposiciones de contaminantes y polvo sobre las fachadas de las edificaciones aumentaran.

Intervenciones sobre las lesiones:

- a. Reparación – Conociendo la causa y evolución patológica de las lesiones en las obras civiles, se procede a aplicar técnicas reparadoras enfocadas a el conjunto constructivo del edificio, buscando principalmente la compatibilidad entre los materiales existentes y el comportamiento de los añadidos para así recuperar de forma progresiva el elemento constructivo. Para resumir el proceso de reparación, este consta de tres etapas: Información previa, conocimiento de lesiones y diagnóstico.
- b. Restauración – Si la reparación se centra en un elemento de estético o en el concreto de la edificación, se interviene mínimamente porque se debe respetar la antigüedad de los materiales y colores, para así salvaguardar la conservación del elemento constructivo.
- c. Rehabilitación – Diagnostico de daños y causas incluyendo un plano actual apoyado en el primitivo mediante un sistema de fonometría para ubicar la detención de anomalías, comparar las propiedades de los materiales de las zonas dañadas y de las sanas, estudiar su evolución, analizar la influencia del clima y de los agentes contaminantes troposféricos sobre los distintos materiales de construcción.
- d. Prevención – Es de sentido común reconocer que en la medida que mejore la calidad del aire y las condiciones medio ambientales habrá una mejora en la vida útil de las obras civiles.

Sin embargo, mientras se logra una mejora en el cuidado ambiental se debe implementar un análisis exhaustivo de las condiciones de los materiales de construcción, adoptando un método de observación y registro de datos, evaluar la capacidad de resistencia y revisar o en su defecto restaurar la integridad, forma y aspecto de los elementos estructurales.

6. Conclusiones

El estudio realizado a través de este artículo sobre el efecto del ozono troposférico en los materiales de construcción demuestra la afectación de la contaminación troposférica en el deterioro de las obras civiles. Algunas lesiones como las grietas, costras negras, ennegrecimiento, amarilleamiento, corrosión y deposición de polvo son las más frecuentes encontradas en las fachadas estructurales, en especial aquellas que se ubican en zonas urbanas con un tráfico vehicular elevado.

Así mismo, se identificaron los contaminantes troposféricos que ocasionan daños en las edificaciones son SO_2 , NO_x , Cl^- y el PM_{10} . Se hizo mención también de modelos matemáticos aplicados en estudios previos en donde es posible predecir el alcance (distancia) del nivel de corrosión troposférica extrema en una costa. En esencia, el aire es el principal medio de transporte de estos contaminantes.

Por otro lado, es importante señalar que los altos niveles de contaminantes troposféricos provienen en su mayoría de fenómenos antropogénicos como la industria y la construcción, razón por la cual



es indispensable emplear acciones estratégicas de mitigación enfocadas en la durabilidad y preservación de la infraestructura física a fin de adaptarse a los futuros efectos del cambio climático. En este sentido, se hace hincapié en la necesidad de realizar intervenciones frecuentes sobre las lesiones en los materiales de construcción, para proteger el estado de la estructura mediante acciones puntuales de restauración, rehabilitación y prevención.

7. Agradecimientos

Se reconoce y agradece el apoyo de la Dirección de Programa de Ingeniería Civil, de la Decanatura de Ingeniería y Ciencias, de la Dirección de Departamento de Ingeniería Civil e Industrial y de la Oficina de Investigaciones de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. También el apoyo de la Ing. María Fernanda Serrano Guzmán, líder del semillero Gestión de Obras.

8. Referencias

- Castañeda, A., (2013). Estudio de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en La Habana. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”.
- Enciclopedia Broto de Patologías de la construcción. [En línea]. Disponible en: http://www.astur-cons.org/docsnormativa/5894_1525.pdf.
- Grossi, C, M.; Brimblecombe, P., (2007). Effect of long-term changes in air pollution and climate on the decay and blackening of European stone buildings. Geological Society, London, Special Publications, 271(1): 117-130.
- Hernandez, A. (2018), “Impact of environmental pollution in the historical buildings of Havana, Cuba. Effect of future climate change”, Revista Ingeniería de Construcción, vol. 33, n°. 3.
- Howland, J, J., (2012). Performance by durability of reinforced concrete structures. Department of Civil Engineering Politechnic Institute of Havana.
- ISO 9223:2012. (2012). Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and estimation. International Standard Organization (ISO).
- Jacob, D.; Winner D. A., (2009). Effect of climate change on air quality. Atmospheric Environment, 43: 51-63. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>.
- Kumas, P.; Imam, B. (2013). Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure. Science of The Total Environment, 444: 85-101. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.056>.
- Ozga, I. J. (2016). Influence of atmospheric pollution on the decay of historic buildings in Old Havana City. (Thesis for the degree of Master in Environmental Management). Superior Institute of Applied Technologies and Sciences: University of Havana.

Sobre el Autor

- **Stephany Rodríguez Rengifo**. Estudiante de pregrado en ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, stephany2709@gmail.com y stepha09@javeriana-cali.edu.co



Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

